



Les véhicules électrifiés réduisent-ils les émissions de carbone ? Un raisonnement prospectif

Adrien Vogt-Schilb, Céline Guivarch, Jean Charles Hourcade

► To cite this version:

Adrien Vogt-Schilb, Céline Guivarch, Jean Charles Hourcade. Les véhicules électrifiés réduisent-ils les émissions de carbone ? Un raisonnement prospectif. 2013. hal-00866450

HAL Id: hal-00866450

<https://hal.science/hal-00866450>

Preprint submitted on 30 Sep 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



No 44-2013

Les véhicules électrifiés réduisent-ils les émissions de carbone ?

Un raisonnement prospectif

Adrien Vogt-Schilb
Céline Guivarch
Jean-Charles Hourcade

January 2013

[CIREd Working Papers Series](#)

C.I.R.E.D.

Centre International de Recherches sur l'Environnement et le Développement

ENPC & CNRS (UMR 8568) / EHESS / AGROPARISTECH

/ CIRAD / MÉTÉO FRANCE

45 bis, avenue de la Belle Gabrielle

F-94736 Nogent sur Marne CEDEX

Tel : (33) 1 43 94 73 73 / Fax : (33) 1 43 94 73 70

www.centre-cired.fr

*Les véhicules électrifiés réduisent-ils les émissions de carbone ?
Un raisonnement prospectif*

Résumé

La pertinence des véhicules électrifiés (VE) pour diminuer les émissions de gaz à effet de serre (GES) est sujette à débat. De nombreuses études fondent le calcul des émissions kilométriques des VE sur le contenu carbone de l'électricité contemporaine. Nous proposons une évaluation qui mobilise une vision cohérente de l'évolution du système énergétique dans lequel les VE doivent s'insérer. Nous utilisons un modèle de simulation prospective pour produire des scénarios contrastés de l'évolution du contenu carbone de l'électricité européenne. Cet exercice suggère que si l'Europe choisit de mettre en place des politiques climatiques destinées à réduire drastiquement ses émissions de GES, le contenu carbone de l'électricité va diminuer rapidement, prolongeant sur le long terme l'avantage actuel des VE sur les véhicules classiques en termes d'émissions par kilomètre.

Mots-clés: véhicules électrique, gaz à effet de serre, bilan carbone, prospective, politiques climatiques.

o

*Will electrified vehicles reduce greenhouse gases emissions?
A prospective reasoning*

Abstract

The effect of electrified vehicles (EVs) on greenhouse gas (GHG) emissions is subject to debate. Many studies assess EV's per-mile emissions based on the current carbon content of electricity. We use a simulation model to generate contrasting scenarios of the carbon content of European electricity. We find that if Europe chooses to implement climate policies in order to significantly reduce GHG emissions, the carbon content of electricity will decrease rapidly. EV's per-mile emissions would then remain lower than those from conventional vehicles.

Keywords : electric vehicles, greenhouse gases, prospective, carbon content, climate policy

Les véhicules électrifiés réduisent-ils les émissions de carbone ?

Un raisonnement prospectif

Adrien Vogt-Schilb, Céline Guivarch, Jean-Charles Hourcade

Centre International de Recherche en Environnement et Développement (CIRED)

mél: vogt@centre-cired.fr

15 janvier 2013

Résumé

La pertinence des véhicules électrifiés (VE) pour diminuer les émissions de gaz à effet de serre (GES) est sujette à débat. De nombreuses études fondent le calcul des émissions kilométriques des VE sur le contenu carbone de l'électricité contemporaine. Nous proposons une évaluation qui mobilise une vision cohérente de l'évolution du système énergétique dans lequel les VE doivent s'insérer. Nous utilisons un modèle de simulation prospective pour produire des scénarios contrastés de l'évolution du contenu carbone de l'électricité européenne. Cet exercice suggère que si l'Europe choisit de mettre en place des politiques climatiques destinées à réduire drastiquement ses émissions de GES, le contenu carbone de l'électricité va diminuer rapidement, prolongeant sur le long terme l'avantage actuel des VE sur les véhicules classiques en termes d'émissions par kilomètre.

Mots clefs : véhicules électrique, gaz à effet de serre, bilan carbone, prospective, politiques climatiques

Abstract

The effect of electrified vehicles (EVs) on greenhouse gas (GHG) emissions is subject to debate. Many studies assess EV's per-mile emissions based on the current carbon content of electricity. We use a simulation model to generate contrasting scenarios of the carbon content of European electricity. We find that if Europe chooses to implement climate policies in order to significantly reduce GHG emissions, the carbon content of electricity will decrease rapidly. EV's per-mile emissions would then remain lower than those from conventional vehicles.

Keywords: electric vehicles, greenhouse gases, prospective, carbon content, climate policy

1. Introduction

Les *véhicules électrifiés*¹ (VE) ont fait leur entrée sur le marché automobile. La plupart des grands constructeurs automobiles mondiaux (aussi bien occidentaux que chinois ou indiens) ont déjà ou s'appêtent à mettre sur le marché au moins un modèle de véhicule électrifié.

Ce décollage de l'offre, s'il repose peut-être sur une anticipation de la hausse des prix du pétrole de la part des constructeurs, est tout de même largement encouragé par les pouvoirs publics. Dans six grandes régions du monde (Australie, Canada, Chine, Corée, Japon, Union Européenne), des normes d'émissions de gaz à effets de serre (GES) des véhicules ont été mises en place: il s'agit d'imposer à

¹ Nous appelons *véhicules électrifiés* ceux qui utilisent de l'électricité du réseau comme source d'énergie primaire, c'est-à-dire les véhicules hybrides rechargeables, les véhicules tout-électriques, et les véhicules électriques à extension d'autonomie. Les véhicules utilisant des technologies comme le *stop and start* et l'hybridation non rechargeable (qui font uniquement intervenir de l'électricité générée par le véhicule lui-même) n'entrent pas dans cette définition.

chaque constructeur de limiter les émissions moyennes des véhicules vendus une année donnée (mesurées en gCO₂/km) en dessous d'un seuil annoncé à l'avance (An et al., 2007; ICCT, 2012).²

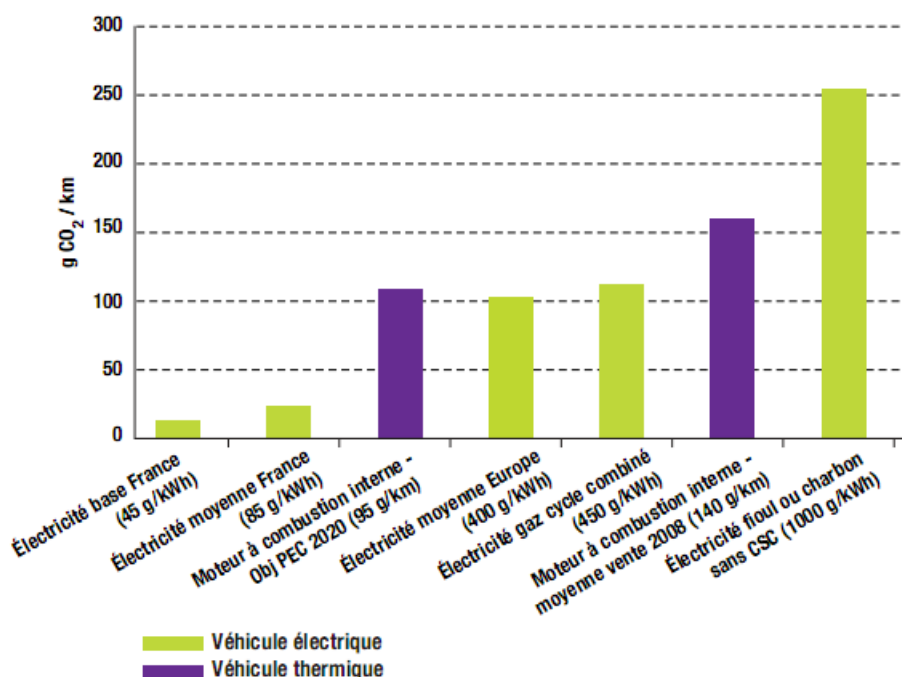


Figure 1 : Émissions du puits à la roue des véhicules thermiques et électriques d'après Ademe (2009)

En abscisse est reporté le contenu carbone de l'électricité provenant de diverses origines, en ordonnée l'intensité carbone d'un véhicule électrique rechargé grâce cette électricité. Pour les véhicules thermiques, l'intensité donnée en abscisses concerne les émissions du réservoir à la roue, et celle en ordonnées concerne les émissions du puits à la roue.

Nous avons modifié cette figure : le moteur a combustion interne de 2020 est caractérisée par des émissions de 95 gCO₂/km et non pas 95 gCO₂/kWh comme indiqué malencontreusement dans la publication de l'Ademe (2009).

De l'argent public est également mis à directement contribution. Ainsi, dans les pays de l'OCDE, diverses aides fiscales favorisent l'achat ou l'usage de véhicules peu émetteurs (OECD, 2009). De surcroît, les pouvoirs publics mettent en place des politiques destinées à promouvoir spécifiquement les véhicules électrifiés (incitations fiscales spécifiquement en faveur des VE, achats publics de flottes, mise en place de bornes de recharge publiques...), encouragées notamment par des organisations internationales (IEA, 2009a). En France, le dispositif du Bonus/Malus a récemment été renforcé, et l'État français verse aujourd'hui entre 4 000 € et 7 000 € aux acheteurs de véhicules électrifiés (MEDDE, 2012).

La principale justification de ces politiques publiques est la volonté de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Pourtant, la pertinence des véhicules électrifiés pour réduire les émissions de GES fait débat. Elle est notamment mise à mal par l'examen rapide du contenu carbone de l'électricité *contemporaine* dans différentes régions (Ademe, 2009; Hawkins et al., 2012; Syrota et al., 2011). Ces études concluent par exemple que l'électricité française, notamment de base, est un bon terreau pour le développement du VE; mais elles tempèrent immédiatement ce constat.

² Pour une motorisation donnée, diminuer l'intensité carbone équivaut à diminuer la consommation, le contenu carbone de l'essence et du diesel étant une donnée physique.

L'Ademe (2009) montre ainsi que le contenu carbone de l'électricité moyenne européenne *actuel* engendrerait des émissions des véhicules électriques comparables à celles de la voiture thermique *attendue en 2020* (Figure 1). De plus, elle montre que les centrales à gaz « cycle combiné » (qui connaissent un développement soutenu en Europe) tirent le contenu carbone du VE à la hausse.

Le rapport Syrota (2011, p. 139) s'intéresse à d'autres régions du monde comme la Chine, le Japon ou la Corée. Il montre que le contenu carbone de l'électricité y est actuellement trop important, ne permettant pas au VE de rivaliser avec les véhicules thermiques sur le plan des émissions de GES.

Une interprétation (hâtive) de ces résultats pourrait être qu'utiliser des VE pour diminuer les émissions de gaz à effet de serre n'est pertinent qu'en France, et à condition de maintenir sur le long terme le choix d'une électricité produite majoritairement à base d'énergie nucléaire (ApE, 2010). Si ce point était vrai, les perspectives pour la filière automobile électrique seraient mauvaises, car les volumes sur le seul marché français ne suffiraient peut-être pas à déclencher une baisse des coûts de production des batteries sur lequel compte le modèle d'affaires de la filière.

Mais ces résultats ne sont en fait qu'une mise en garde, ils montrent que favoriser le développement des véhicules électrifiés sans se soucier du contenu carbone de l'électricité serait une erreur. Une réponse cohérente à la question posée ne peut pas comparer les performances *futures* des véhicules thermiques aux performances *actuelles* des véhicules électriques. Ces dernières doivent également être anticipées, d'autant plus que leur évolution, difficile à prévoir en première lecture, dépend plus de choix sociétaux que d'incertitudes exogènes (voir plus bas).

L'objectif de cet exercice est de proposer une évaluation des émissions de GES imputables aux véhicules électriques et de la comparer à celles provenant des véhicules thermiques. La méthode utilisée est décrite à la section 2, les résultats sont ensuite présentés en section 3, puis la section 4 conclut.

2. Méthode

Nous partons de la méthode et hypothèses chiffrées utilisées par l'Ademe (2009), et nous intégrons des projections temporelles du contenu carbone de l'électricité moyenne européenne. Toutes les autres hypothèses sont conservées à l'identique.

Ainsi, l'intensité carbone retenue pour évaluer les véhicules concerne les émissions du puits à la roue, calculées à partir de la consommation estimée sur le cycle d'homologation NEDC (Feng and Sauer, 2004). Le calcul doit être mené différemment pour les véhicules électrifiés et les véhicules thermiques. Pour les véhicules thermiques, il s'agit des émissions du réservoir à la roue tels qu'évaluées sur le cycle NEDC, auxquelles l'Ademe ajoute 15% pour tenir compte des émissions imputables à l'extraction, transport et raffinage des produits pétroliers.³ Par ailleurs, on identifie l'évolution de la consommation des véhicules thermiques à l'évolution proposée de la norme NEDC par l'Union Européenne, qui fixe un objectif de 95 gCO₂/km en 2020.

Pour les véhicules électriques, les calculs de l'Ademe se basent sur une consommation de la batterie à la roue de 20kWh/100km, majorée de 20% pour prendre en compte les pertes liées à la distribution

³ Le calcul ne prend en particulier pas en compte le différentiel entre l'usage réel des véhicules et le cycle NEDC. Cette différence en défaveur de l'usage réel est appelé *on road gap factor* dans la littérature, qui l'évalue entre 15 et 20% (IEA, 2009b). Elle provient d'une part des fonctions annexes du véhicules (autoradio, climatisation, éclairage, essuies-glaces...) qui ne sont pas activées pendant l'homologation, et d'autre part du style de conduite en conditions réelles qui peut être plus consommateur que celui simulé par NEDC (feux rouges plus fréquents en ville, accélérations agressives...). Cette hypothèse est justifiée par la transparence qu'elle introduit (les consommations homologuées sont mieux connues que les consommations réelles). Elle ne pose pas de problème tant que le *gap factor* est le même pour les véhicules thermiques et électrifiés.

d'électricité et à la recharge de la batterie. Pour évaluer les émissions de CO₂ du puits à la roue, le calcul incorpore le contenu carbone moyen de l'électricité⁴.

Ces hypothèses sont conservatrices en défaveur des véhicules électriques. D'une part, la consommation retenue pour les VE est élevée : l'autonomie homologuée de la Renault Fluence Z.E (une petite berline) correspond par exemple à une consommation de 11.9 kWh/100km. De plus, la consommation des véhicules électriques pourrait baisser dans le temps à l'instar de celle des véhicules thermiques, par exemple suite au progrès technique sur la chaîne de traction, la récupération d'énergie cinétique au freinage, ou une baisse de la masse des véhicules.

D'autre part, la consommation projetée des véhicules thermiques est peut-être légèrement trop basse. En effet, les normes NEDC concernent la moyenne des ventes toutes technologies confondues et s'appliquent donc à un mix contenant des véhicules électrifiés. Les émissions moyennes des seuls véhicules thermiques en 2020 devraient donc se trouver au dessus des 95 gCO₂/km retenus par l'Ademe.

Nous réalisons des projections de l'évolution temporelle de l'intensité carbone de l'électricité européenne avec le modèle Imacim-R développé au Cired. Il s'agit d'un modèle d'équilibre général hybride qui combine des points de vue d'ingénieur et d'économiste en alliant une représentation monétaire (en dollars) et physique (par exemple en MWh ou en passager-kilomètre) des flux économiques. Il permet de développer des scénarios prospectifs cohérents de l'évolution de variables macroéconomiques (PIB, prix du pétrole, de l'électricité...), sous-tendues par celle des systèmes techniques (composition du parc de production d'électricité, description explicite des technologies de véhicules...). Des descriptions détaillées du modèle ont été publiées dans de nombreux articles scientifiques (Gherzi et al., 2012; Rozenberg et al., 2010; Sassi et al., 2010; Waisman et al., 2012).

Pour générer ces scénarios prospectifs de l'évolution du système sociotechnique avec Imacim-R, nous distinguons d'une part les sources d'incertitude qui proviennent de l'état de la nature ou de l'avancée de la technique (quel est le montant des réserves de pétrole dans le monde ? combien coûteront les éoliennes de demain ?), et d'autre part celle provenant des choix de société (quel sera la structure de la croissance chinoise ? quel avenir pour les négociations climatiques internationales ?).

Pour capturer cette incertitude, nous réalisons plusieurs scénarios à partir d'hypothèses contrastées. Dans le cadre de cette étude, nous avons testé des variantes sur les coûts et potentiels des technologies de production d'électricité bas carbone et la mise en place ou non de politiques climatiques ambitieuses (voir Table 1 et plus bas).⁵

		Technologies bas carbone	
		Optimiste	Pessimiste
Politiques Climatiques	Scénario au fil de l'eau	Base&techno+	Base&techno-
	Objectifs de mitigation	Climat&techno+	Climat&techno-

Table 1 Hypothèses et nom des quatre scénarios

⁴ La pertinence d'utiliser le contenu carbone *moyen* est discutée dans la littérature (Syrota et al., 2011). Cette mesure est sous-estimée si les VE sont de fait rechargés pendant l'heure de pointe, mais surestimée s'ils sont chargés en base (par exemple si un simple minuteur se charge de lancer la recharge en heure creuse). Le contenu carbone moyen choisi par l'étude de l'Ademe apparaît donc comme un compromis raisonnable.

⁵ Nous avons également testé des variantes sur le montant des réserves d'énergie fossile disponibles, le coût de production des carburants de synthèses (agrocarburants et charbon liquéfié), les styles de développement des pays émergents (notamment le contenu en transport de la croissance) et la durée de la crise économique actuelle. Leur impact sur la pertinence de l'électrification des véhicules est de second ordre.

La première hypothèse concerne les politiques climatiques. Nous proposons d’une part des scénarios dits « au fil de l’eau », qui n’incorporent aucune politique publique de réduction des émissions de GES. En particulier, le coût du carbone est nul dans ces scénarios. Les autres scénarios incorporent des objectifs de mitigation : l’Europe s’engage à et se donne les moyens diviser ses émissions de gaz à effet de serre par trois entre 2001 et 2050. Elle est la plus volontariste d’une coalition mondiale dont le but est la division par deux des émissions de GES sur cette période. Dans ces scénarios, le modèle calcule chaque année le prix du carbone qui permet d’atteindre les objectifs d’émissions fixés.

La seconde hypothèse concerne les coûts et potentiels des technologies de production d’électricité bas-carbone – centrales nucléaires, renouvelables intermittents, centrales à énergie fossiles équipées de capture et séquestration du carbone (CSC). Dans le cas optimiste, le taux d’apprentissage de ces technologies et leur potentiel maximal sont plus élevés que dans le cas pessimiste. Le potentiel maximal limite dans le modèle la part de marché atteignable par une technologie donnée. Il reflète aussi bien des enjeux technologiques (par exemple, gestion de l’intermittence des énergies renouvelables, disponibilité des réservoirs pour la CSC) que sociétaux (par exemple, acceptabilité du nucléaire).

3. Résultats

La Figure 2 affiche l’évolution du contenu carbone de l’électricité européenne telle que simulée par le modèle Imacim-R dans les quatre scénarios (échelle de gauche). Celui-ci part de 384 gCO₂/kWh en 2008 (proche des 400g/kWh retenus dans l’étude de l’Ademe). Cette année là, le VE émet donc 96 gCO₂/km, à comparer aux 176 gCO₂/km en moyenne des ventes cette année là (courbe NEDC en violet) : dès aujourd’hui, un VE rechargé grâce à l’électricité européenne moyenne permet de réduire les émissions de CO₂.

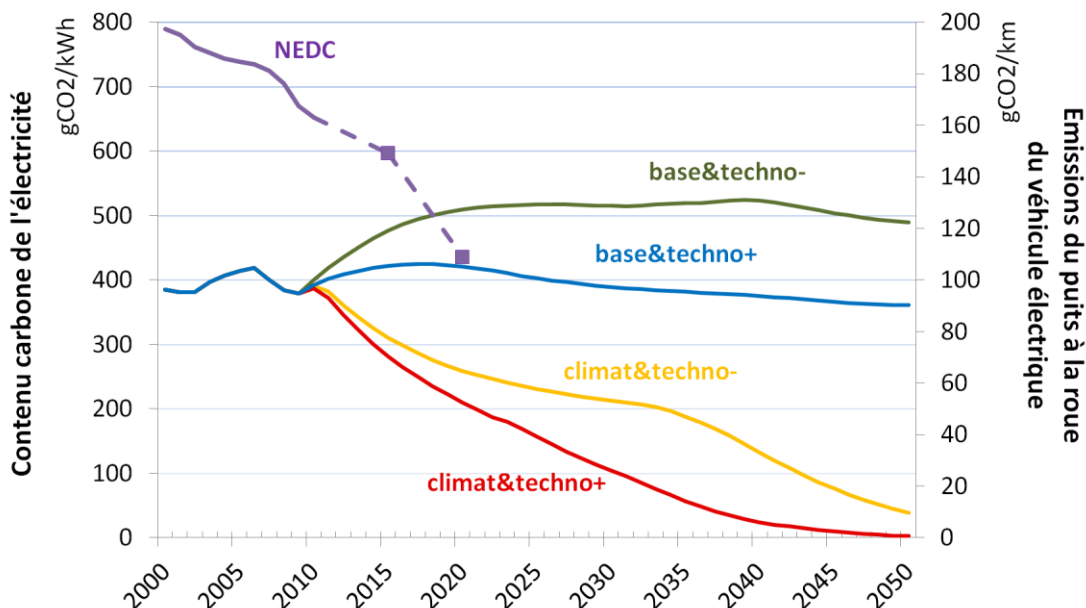


Figure 2 : Contenu carbone de l’électricité européenne, implication pour les émissions du puits à la roue pour un VE, et comparaison avec les émissions du puits à la roue d’un véhicule aux normes NEDC

Les traits colorés représentent les quatre scénarios, alternativement optimistes (« techno ») ou pessimistes sur le coût des technologies de production d’électricité propre, et avec (« climat ») ou sans (« base ») politiques climatiques

Dans les scénarios sans politiques climatiques, le contenu carbone de l'électricité européenne reste pratiquement constant ou augmente légèrement en fonction des hypothèses sur les technologies bas carbone. Si elles sont optimistes (label « base&techno+ »), la composition du parc évolue peu pendant la première moitié du 21^{ème} siècle. Si elles sont pessimistes (« base&techno- ») la part du nucléaire diminue et l'intensité carbone de l'électricité se stabilise autour de 500 g/kWh. Ainsi, si la réglementation NEDC devait se prolonger sans que d'autres politiques climatiques ne soient mises en œuvre en Europe, les émissions des VE deviendraient supérieures à celles imposées par la norme entre 2018 et 2021.

Mais si l'Europe engage une politique de réduction des émissions de GES (labels « climat&techno- » et « climat&techno+ »), le contenu carbone de l'électricité européenne décroît pour atteindre un niveau très faible en 2050. Il est compris entre 155 et 262 gCO₂/kWh en 2020, 103-216 g/kWh en 2030 et 3-42g/kWh en 2050⁶, en fonction des hypothèses sur les coûts et potentiels des technologies bas carbone (la baisse est bien entendu plus rapide dans le scénario optimiste).

Ce résultat robuste à l'incertitude sur les potentiels et les coûts des technologies de production d'électricité décarbonée (énergie renouvelable, nucléaire, séquestration du carbone) est confirmé par les études de l'Agence internationale de l'énergie (IEA, 2009a), et plus largement, par la communauté scientifique (Edenhofer et al., 2010). Ces études montrent que dans toutes les régions du monde, la réalisation de l'objectif de stabilisation climatique passe de toute façon par une électricité presque entièrement décarbonée en 2050.

En effet, les politiques climatiques fixent un prix du carbone, ce qui incite les producteurs d'électricité à utiliser en priorité les moyens de production disponibles moins carbonés (par exemple du gaz plutôt que du charbon). Surtout, les investissements dans de nouvelles centrales sont redirigés vers des technologies à bas contenu carbone. La décarbonisation du secteur de l'électricité est ainsi déclenchée pour des valeurs modérées de prix du carbone, et s'avère moins chère que celle d'autres importants contributeurs aux émissions de GES, comme l'habitat, l'industrie ou les transports. On connaît les moyens utilisés pour atteindre ce résultat: il s'agit des énergies renouvelables (notamment solaire, éolien et biomasse), d'énergies émettrices adossées à de la séquestration de carbone, et d'énergie nucléaire. Si la part idéale de chacune de ces technologies en 2050 fait débat, la littérature s'accorde sur la nécessité d'atteindre un parc de production d'électricité presque entièrement décarboné à cette échéance pour tenir les objectifs climatiques.

Ce dernier point est connu des décideurs publics : la Commission Européenne affiche par exemple l'ambition d'atteindre en 2050 des réductions d'émissions de CO₂ dans le secteur de l'électricité de près de 95% par rapport à leur niveau de 1990, en passant par une réduction comprise entre 54 et 68 % en 2030 (CE, 2011).

La Figure 2 montre également l'intensité carbone du puits à la roue qui serait imputable au VE dans ces scénarios⁷ (deuxième axe ordonnées), et fournit une comparaison avec les normes d'émissions proposées par l'UE⁸. Un véhicule électrique serait responsable, dans les scénarios avec politiques climatiques, de 51-66g/km en 2020 (à comparer aux 109 gCO₂/km de la norme NEDC), 26-54g/km en 2030 et enfin 1-11g/km en 2050. Cette évolution permet donc au VE européen de conserver son avantage environnemental sur le véhicule thermique.

⁶ Contrairement à l'Ademe, nous ne prenons pas en compte les émissions imputables à la construction des centrales. Cette simplification n'influence pas le message principal de cette étude : en cas de politiques climatiques, le contenu carbone de l'électricité diminuera très significativement.

⁷ On retient un facteur de conversion de 25 kWh/100km comme expliqué dans la section 2.

⁸ Les intensités du réservoir à la roue sont augmentées d'un facteur 1.15 comme expliqué dans la section 2. Le 95 gCO₂/km de 2020 devient par exemple 109 gCO₂/km lorsque les pertes de raffinage et de transport du pétrole brut sont prises en comptes.

Les quatre scénarios présentés ici ne doivent pas être considérés sur un pied d'égalité. Alors que l'incertitude provenant des potentiels technologiques peut-être considérée comme exogène, la mise en place de politiques climatiques est un choix de société entièrement endogène. De plus, la question des émissions de GES imputables aux VE n'est pertinente qu'au regard de l'objectif climatique, c'est-à-dire dans les scénarios à contenu carbone de l'électricité faible.

4. Conclusion

Cette étude rappelle que si l'Europe fait le choix de réduire ses émissions de CO₂ totales d'ici 2050, le contenu carbone de son électricité va diminuer fortement pendant cette période. Ce choix politique écrase l'incertitude sur l'évolution du contenu carbone de l'électricité provenant des coûts et potentiels des technologies bas carbone.

De ce fait, les émissions kilométriques des VE, déjà inférieures à celles des véhicules thermiques, le resteront sur le long terme, malgré l'évolution attendue de ces dernières, tirée à la baisse par les normes NEDC de l'Union Européenne. Ce résultat suggère que l'électrification des véhicules privés est une solution pertinente pour décarboner la mobilité privée.

Ce diagnostic ne s'applique pas uniquement aux véhicules tout-électriques. La pertinence de l'électrification concerne toutes les technologies automobiles qui utilisent de l'électricité du réseau comme énergie primaire, comme les hybrides rechargeables et les véhicules électriques à extension d'autonomie: chaque kilomètre parcouru grâce à de l'électricité provenant du réseau diminuera sensiblement leurs émissions de carbone.

Remerciements

Cette étude a bénéficié du financement de l'École des Ponts ParisTech et de l'Institut de la Mobilité Durable (Renault, ParisTech). Les auteurs remercient Éric Champarnaud, Emeric Fortin, Antonin Pottier et Julie Rozenberg pour leurs commentaires. Les erreurs restantes sont celles des auteurs.

Références

- Ademe, 2009. Les transports électriques en France: un développement nécessaire sous contraintes. Ademe & vous - Stratégie & études.
- An, F., Gordon, D., He, H., Kodjak, D., Rutherford, D., 2007. Passenger Vehicle Greenhouse Gas and Fuel Economy Standards: A Global Update. The international council on clean transportation, Washington DC.
- ApE, 2010. Les trois freins au développement de la voiture électrique. Agir pour l'Environnement.
- CE, 2011. Feuille de route vers une économie compétitive à faible intensité de carbone à l'horizon 2050 (Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions No. COM(2011) 112 final). Commission Européenne, Bruxelles.
- Edenhofer, O., Knopf, B., Leimbach, M., Bauer, N., 2010. The Economics of Low Stabilization. Energy Journal 31.
- Feng, A., Sauer, A., 2004. Comparison of Passenger Vehicle Fuel Economy and GHG Emission Standards Around the World. Pew Center on Global Climate Change.
- Gherji, F., McDonnell, S., Sassi, O., 2012. Do overarching mitigation objectives dominate transport-specific targets in the EU? Energy Policy.
- Hawkins, T.R., Singh, B., Majeau-Bettez, G., Strømman, A.H., 2012. Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles. Journal of Industrial Ecology.
- ICCT, 2012. Global Comparison of Light-Duty Vehicle Fuel Economy/GHG Emissions Standards. Washington DC, USA.
- IEA, 2009a. Electric and plug-in hybrid electric vehicles, Technology Roadmap. OECD/International Energy Agency, Paris, France.
- IEA, 2009b. Transport Energy and CO₂: Moving towards Sustainability. Organisation for Economic Co-operation and Development,, Paris, France.

- MEDDE, 2012. Bonus-Malus 2012 - Ministère du Développement durable. Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie. URL <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Bonus-Malus-2012,2041.html> (accessed 10.8.12).
- OECD, 2009. Incentives for CO2 emission reductions in current motor vehicle taxes. Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris.
- Rozenberg, J., Hallegatte, S., Vogt-Schilb, A., Sassi, O., Guivarch, C., Waisman, H., Hourcade, J.-C., 2010. Climate policies as a hedge against the uncertainty on future oil supply. *Climatic Change* 101, 663–668.
- Sassi, Hourcade, J.-C., Crassous, R., Gitz, V., Waisman, H., Guivarch, C., 2010. IMACLIM-R: a modelling framework to simulate sustainable development pathways. *International Journal of Global Environmental Issues* 10, 5 – 24.
- Syrota, J., Étienne Beeker, Alan Bryden, Johanne Buba, Caroline Le Moign, Felix Von Pechmann, 2011. La voiture de demain: carburants et électricité. Conseil d'Analyse Stratégique, Paris.
- Waisman, H., Guivarch, C., Grazi, F., Hourcade, J.C., 2012. The I maclim-R model: infrastructures, technical inertia and the costs of low carbon futures under imperfect foresight. *Climatic Change* 1–20.